

## ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ № 4 ■ 2014

<http://dx.doi.org/10.15589/jnn20140407>

УДК 621.791.923.6:62-135

К 72

COMPARATIVE HIGH-TEMPERATURE WEAR RESISTANCE  
OF CHS88U-VI ALLOY AND H30N50YU5T2 SATELLITEСРАВНИТЕЛЬНАЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ  
СПЛАВА ЧС88У-ВИ И СТЕЛЛИТА Х30Н50Ю5Т2

Oleksandr M. Kostin

[kostin.weld@gmail.com](mailto:kostin.weld@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-4739-660X

Anastasiia Yu. Butenko

[Jane\\_boxx@mail.ru](mailto:Jane_boxx@mail.ru)

ORCID: 0000-0001-7631-7213

Volodymyr O. Martynenko

[volodymyr.martynenko@nuos.edu.ua](mailto:volodymyr.martynenko@nuos.edu.ua)

ORCID: 0000-0003-4067-3640

А. М. Костин,

канд. техн. наук, доц.;

А. Ю. Бутенко,

асп.;

В. А. Мартыненко,

канд. техн. наук, доц.

National University of Shipbuilding, Mykolayiv

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

**Abstract.** The optimal compositions and application techniques of wear-resistant alloys on platforms of turbine blades are discussed. It is demonstrated that the serious problems arise when choosing the necessary alloying materials despite the apparent variety of them. Such a choice is significantly complicated by the lack of quantitative characteristics of wear-resistance of widely used alloying materials and basic heat-resistant alloys. Consequently, the aim of the study was to determine the quantitative comparative characteristics of wear-resistance of the ЧС88У-ВИ casting heat-resistant nickel alloy and the Х30Н50Ю5Т2 stellite at peak temperatures of gas turbine engines exploitation in the conditions most closely resembling the actual ones. It is established that the ЧС88У-ВИ alloy in the conditions of high temperature tests ( $\sim 1150$  °C) which are close to the solution temperatures of the  $\gamma'$ -phase demonstrates the considerably higher resistance than the Х30Н50Ю5Т2 stellite.

**Keywords:** the working blade, the platform, hardening, oxy-acetylene surfacing, hardness, wear-resistance.

**Аннотация.** Показано, что при кажущемся обилии наплавочных материалов при их выборе возникают серьезные проблемы. В этой связи целью исследований явилось определение количественных сравнительных характеристик износостойкости литейного жаропрочного никелевого сплава ЧС88У-ВИ и стеллита Х30Н50Ю5Т2. Установлено, что стойкость сплава ЧС88У-ВИ при температурах испытаний, близких к температурам растворения  $\gamma'$ -фазы, значительно выше, чем стеллита.

**Ключевые слова:** рабочая лопатка, бандажная полка, упрочнение, ацетиленокислородная наплавка, твердость, износостойкость.

**Анотація.** Показано, що при уявній великій кількості наплавочних матеріалів при їх виборі виникають серйозні проблеми. У цьому зв'язку метою досліджень було визначення кількісних порівняльних характеристик зносостійкості ливарного жароміцного нікелевого сплаву ЧС88У-ВИ та стеліту Х30Н50Ю5Т2. Установлено, що стійкість сплаву ЧС88У-ВИ при температурах випробувань, близьких до температури розчинення  $\gamma'$ -фази, значно вища, ніж стеліту.

**Ключові слова:** робоча лопатка, бандажна полиця, зміцнення, ацетиленокисневе наплавлення, твердість, зносостійкість.

## REFERENCES

- [1] Altukhov A.A., Gavrilov O.V. Primenenie zharostoykogo materiala KBNKhL-2 dlya naplavki detaley gazovykh turbin [Application of KBHXL-2 heat-resistant material for surfacing of gas turbines details]. *Svarshchik – Welder*, 2004, no. 2, pp. 22–23.
- [2] Kostin A.M., Butenko A.Yu., Kvasnitskiy V.V. Materialy dlya uprochneniya lopatok gazovykh turbin [Materials for hardening of gas turbines blades]. *Avtomaticheskaya svarka – Automatic welding*, 2014, no. 6–7, issue 733, pp. 136–138.

- [3] Peychev G.I., Zamkovoy V.Ye., Andreychenko N.V. Sravnitelnye kharakteristiki iznosostoykikh splavov dlya uprochneniya bandazhnykh polok rabochikh lopatok gazoturbinnnykh dvigateley [Comparative characteristics of wear-resistant alloys for hardening of platforms of working blades of gas turbine engines]. *Vestnik dvigatelestroeniya* [Bulletin of Engine Engineering], 2009, no. 2, pp. 123–125.
- [4] Peychev G.I., Shurin A.K., Zamkovoy V.Ye. and others Razrabotka i vnedrenie vysokotemperaturnogo iznosostoykogo splava dlya uprochneniya bandazhnykh polok lopatok GTD [Development and implementation of high temperature wear-resistant alloy for hardening of platforms of the GTE blades]. *Vestnik dvigatelestroeniya* [Bulletin of Engine Engineering], 2009, no. 2, pp. 15–18.
- [5] Som A.I., Ishchenko V.Yu., Malyy A.B. Plazmenno-poroshkovaya naplavka stellite fiksatorov trub [Plasma powder surfacing by pipe clamps stellite]. *Svarshchik – Welder*, 2004, no. 2, pp. 18–19.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Серьезной проблемой эксплуатации газотурбинных двигателей на фоне постоянного роста рабочей температуры газовой среды является отсутствие жаро- и износостойкого материала, который в полной мере мог бы обеспечивать износостойкость контактных поверхностей рабочих лопаток газотурбинных двигателей во всем температурном диапазоне их эксплуатации. При этом износостойкость основного материала при пиковых температурных нагрузках остается недостаточно изученной и вызывает у практиков несомненный интерес.

В работе в качестве основного материала рассмотрен литейный жаропрочный никелевый сплав ЧС88У-ВИ. Считается, что данный материал характеризуется недостаточным уровнем эксплуатационных характеристик. В этой связи существует необходимость использовать для упрочнения контактных поверхностей (бандажных полок) рабочих лопаток турбин материалы, которые удовлетворяют критериям эксплуатации двигателей.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

На отечественных предприятиях, изготавливающих газотурбинные двигатели, для придания контактным поверхностям рабочих лопаток необходимых свойств, в частности горячей твердости и износостойкости, в настоящее время используют различные составы и способы упрочнения. Например, хорошо известен метод ручной аргонодуговой наплавки литыми прутками стеллита на основе кобальта марки Пр-ВЗК-р, диаметром 2...3 мм. Наплавка стеллита характеризуется высокой твердостью, износостойкостью и коррозионной стойкостью [3, 5]. При этом существующая технология имеет ряд серьезных недостатков, основные из них:

- поскольку сплавы типа ЧС88У-ВИ и им подобные принадлежат к плохо свариваемым, при их нагреве электрической дугой могут возникать трещины, которые усугубляются разницей коэффициентов линейного термического расширения основного и наплавляемого металлов;

- для обеспечения заданной твердости наплавку деталей необходимо выполнять минимум в два прохода, что существенно усложняет существующий технологический процесс.

Подобные характеристики обеспечивает наплавочный материал Х30Н50Ю5Т2, однако количественные показатели его высокотемпературной износостойкости при пиковых температурных нагрузках остаются также недостаточно изученными.

В качестве наплавочной композиции используют также никелевый сплав КБНХЛ-2, который обеспечивает высокое качество наплавленного металла без внешних и внутренних дефектов, со стабильной твердостью около 60 HRC по всей площади торца либо бандажной полки рабочей лопатки [1]. Недостатком указанного сплава является его относительно низкая температура плавления (~1080 °С), что при эксплуатационных забросах температуры нередко приводит к оплавлению контактных поверхностей и выходу из строя двигателя в целом.

Проблему повышения жаростойкости и износостойкости бандажных полок рабочих лопаток газотурбинных двигателей решают, в частности, напайкой на контактные поверхности пластин из сплава на кобальтовой основе ХТН-61, эксплуатация которого возможна при температурах до 1100 °С [4]. Однако пайку необходимо выполнять в вакууме, с использованием дорогостоящего оборудования, что не всегда является целесообразно.

Таким образом, у технологов возникают серьезные проблемы при выборе наплавочного материала. Существенно затрудняет этот выбор отсутствие количественных характеристик износостойкости распространенных наплавочных материалов.

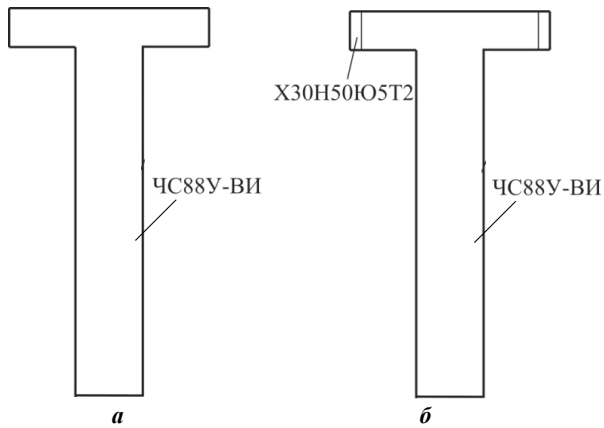
**ЦЕЛЬ РАБОТЫ** – определение количественных сравнительных характеристик износостойкости литейного жаропрочного никелевого сплава ЧС88У-ВИ и стеллита Х30Н50Ю5Т2 при пиковых температурах эксплуатации газотурбинных двигателей, в условиях, максимально приближенным к реальным.

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Исследования износостойкости указанных сплавов выполняли на оригинальной установке, разработанной в Запорожском национальном техническом университете, которая позволяет проводить испытания образцов при сложном динамическом нагружении (режим соударения с последующим проскальзыванием в продольном направлении), с нагревом образцов в среде продуктов сгорания топлива. При этом имеется возможность выполнять физическое моделирование

процессов и осуществлять сравнительную оценку фрикционных пар реальных трибосопряжений в условиях, близких к условиям эксплуатации.

На рис. 1 схематически показан внешний вид опытных образцов из основного металла лопаток и с наплавленным по торцам упрочняющим слоем стеллита X30H50Ю5T2.



**Рис. 1.** Схема опытных образцов из сплава ЧС88У-ВИ без нанесения упрочняющего слоя (*а*) и с наплавленным слоем стеллита X30H50Ю5T2 (*б*)

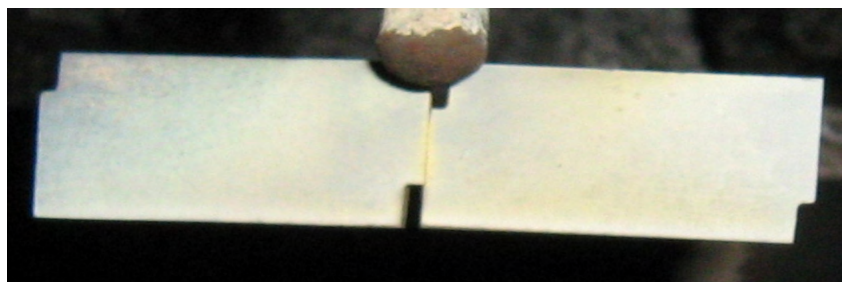
Условия испытаний: температура  $\sim 1150$  °С, первоначальная нагрузка – 50 МПа, амплитуда взаимного перемещения – 0,169 мм, время испытаний – 2 ч. Влияние температуры на износостойкость образцов оценивали по результатам испытаний в среде продуктов сгорания авиационного керосина марки ТС-1.

На первом этапе эксперимента был испытан основной металл рабочих лопаток – материал ЧС88У-ВИ. Выполнен пробный запуск колебательных движений образцов при комнатной температуре, время соударения составляло 1 мин, при визуальном осмотре износа контактных поверхностей не обнаружено. Перед запуском установки (колебательное движение образцов) температура в зоне контакта опытных образцов 1145 °С, температура газа перед образцами (точка 1) – 1212 °С, над образцами (точка 2) – 1163 °С, за образцами (точка 3) – 1130 °С. Испытание проводилось в течение 2 ч. В табл. 1 приведены замеры температуры по трем точкам на протяжении всего опыта.

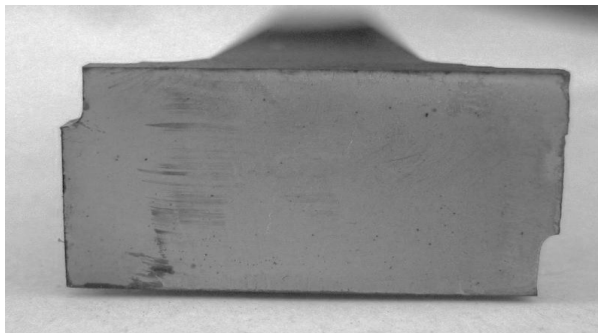
Внешний вид опытных образцов из материала ЧС88У-ВИ и зоны их контакта после проведенных испытаний показаны на рис. 2.

**Таблица 1.** Замеры температуры газовой среды при испытании опытных образцов в различных зонах нагрева

Испытуемый материал	Время испытания, мин	Температура газа, °С		
		Точка 1	Точка 2	Точка 3
ЧС88У-ВИ	30	1234	1217	1120
	60	1259	1161	1046
	90	1280	1193	1070
	120	1291	1248	1229
X30H50Ю5T2	30	1220	1184	1065



*а*



*б*



*в*

**Рис. 2.** Внешний вид опытных образцов из материала ЧС88У-ВИ (*а*) и зоны их контакта (*б, в*) после испытания на износостойкость

На втором этапе проводилось испытание опытных образцов, наплавленных стеллитом Х30Н50Ю5Т2. Выполнен пробный запуск колебательных движений образцов при комнатной температуре, время соударения составляло 1 мин. После этого, на контактных поверхностях, невооруженным глазом выявлены гранулоподобные следы продуктов износа. Перед запуском установки (колебательное движение образцов) температура в зоне контакта опытных образцов составляла 1140 °С, газа перед образцами (точка 1) – 1210 °С, над образцами (точка 2) – 1170 °С, за образцами (точка 3) – 1080 °С. Испытание планировалось проводить, как и предыдущее, в течение 2 ч, одна-

ко спустя 40 мин наблюдался сильный износ контактных поверхностей, вследствие чего испытание было остановлено. Общее время составило 1 ч. В табл. 1 приведены замеры температур в трех зонах на протяжении всего опыта.

Внешний вид опытных образцов с наплавкой стеллитом Х30Н50Ю5Т2 и зоны их контакта после проведения испытаний показаны на рис. 3. На рисунке хорошо видно, что контактные поверхности, наплавленные стеллитом, после 40 мин испытаний не выдерживают данные динамические и температурные нагрузки. В результате выявлено большое количество сколов, трещин, что свидетельствует о разрушении упрочняющего слоя образца.

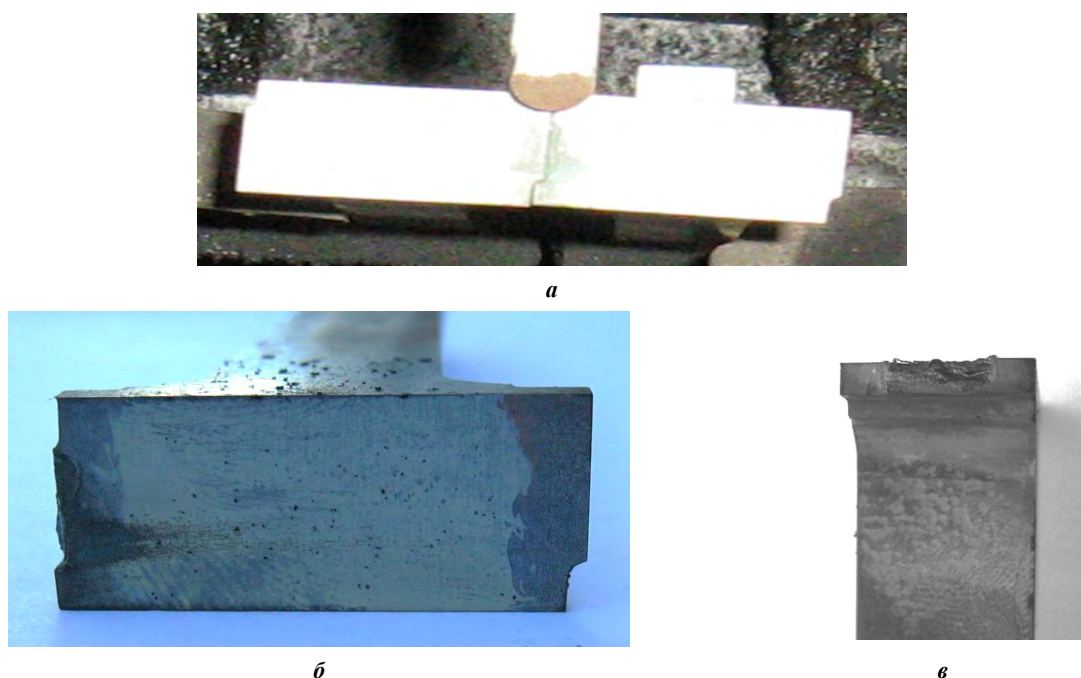


Рис. 3. Внешний вид опытных образцов, наплавленных стеллитом Х30Н50Ю5Т2 (а), и зоны их контакта (б, в) после испытания на износостойкость

Всего в ходе эксперимента испытано по три образца каждого состава. Внешним осмотром значительных отличий в результатах не обнаружено.

Для исключения возможного влияния температуры испытаний на физико-механические свойства исследуемых материалов и последующие результаты оценки износостойкости испытания образцов проводились в контакте только одной исследуемой стороной.

Износостойкость опытных материалов оценивали по интенсивности изнашивания:  $J_v = V/N$ , где  $J_v$  – объемная интенсивность изнашивания, мм<sup>3</sup>/цикл;  $V$  – объем изношенного материала (определяется по профилограмме образцов), мм<sup>3</sup>;  $N$  – количество циклов нагружения (соответствует частоте колебания образцов).

Количественные результаты испытаний высокотемпературной износостойкости приведены в табл. 2.

Таблица 2. Интенсивность изнашивания опытных сплавов

Материал	Температура в зоне контакта, °С	Время испытания, мин	Средняя интенсивность изнашивания $J_v \cdot 10^{-6}$ , мм <sup>3</sup> /цикл
ЧС88У-ВИ	~1150	120	2,379
Х30Н50Ю5Т2	~1150	60	10,126

Анализ результатов испытаний показал, что стеллит Х30Н50Ю5Т2 не выдерживает данных динамических и температурных нагрузок. На контактных поверхностях обнаруживается значительное количество окалины, сколов, трещин, задиров, наплывов, что свидетельствует о разрушении упрочняющего слоя наплавки. Сплав ЧС88У-ВИ показывает значительно более высокую стойкость к высокотемпературному износу.



Средняя интенсивность изнашивания сплава ЧС88У-ВИ, на базе испытаний 2 ч, в среднем в 4 раза ниже, чем у стеллита Х30Н50Ю5Т2 на базе испытаний 1 ч.

В реальных условиях работы, кроме заданных температурных нагрузок, которые составляют минимальный процент от общего времени работы двигателя, имеет также важное значение работоспособность износостойких материалов при температурах запуска ( $\sim 20^\circ\text{C}$ ) и особенно при рабочих температурах эксплуатации ( $\sim 900^\circ\text{C}$ ), что требует дальнейших детальных исследований [2].

### ВЫВОДЫ

1. При температуре испытаний  $\sim 1150^\circ\text{C}$ , первоначальной нагрузке 50 МПа и амплитуде взаим-

ного перемещения образцов 0,169 мм интенсивность изнашивания  $J_v \cdot 10^{-6}$ , мм<sup>3</sup>/цикл для испытываемых материалов характеризуется следующими значениями:

- ЧС88У-ВИ – 2,379 (2 ч испытаний);
- Х30Н50Ю5Т2 – 10,126 (40 мин испытаний).

2. В условиях заданных температур испытаний ( $\sim 1150^\circ\text{C}$ ), которые близки к температуре растворения  $\gamma'$ -фазы, объемное содержание и морфология упрочняющей дисперсной фазы не играют решающей роли в обеспечении высокой износостойкости упрочняющей композиции. В этом случае значительно более важное влияние оказывают свойства твердорастворной основы сплава.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Алтухов, А. А. Применение жаростойкого материала КБНХЛ-2 для наплавки деталей газовых турбин [Текст] / А. А. Алтухов, О. В. Гаврилов // Сварщик. – 2004. – № 2. – С. 22–23.
- [2] Костин, А. М. Материалы для упрочнения лопаток газовых турбин [Текст] / А. М. Костин, А. Ю. Бутенко, В. В. Квасницкий // Автоматическая сварка. – 2014. – № 6–7 (733). – С. 136–138.
- [3] Пейчев, Г. И. Сравнительные характеристики износостойких сплавов для упрочнения бандажных полок рабочих лопаток газотурбинных двигателей [Текст] / Г. И. Пейчев, В. Е. Замковой, Н. В. Андрейченко // Вестник двигателестроения. – 2009. – № 2. – С. 123–125.
- [4] Разработка и внедрение высокотемпературного износостойкого сплава для упрочнения бандажных полок лопаток ГТД [Текст] / Г. И. Пейчев, А. К. Шурин, В. Е. Замковой [и др.] // Вестник двигателестроения. – 2009. – № 2. – С. 15–18.
- [5] Сом, А. И. Плазменно-порошковая наплавка стеллитом фиксаторов труб [Текст] / А. И. Сом, В. Ю. Ищенко, А. Б. Малый // Сварщик. – 2004. – № 2. – С. 18–19.

© О. М. Костін, А. Ю. Бутенко, В. О. Мартиненко

Надійшла до редколегії 13.05.2014

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК  
д-р техн. наук, проф. В. Ф. Квасницький